

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

KATEDRA MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

Srovnání vlastností oceli S355J2H po tepelném zpracování v tunelové nebo krokové peci.
A comparison of structure and properties of S355J2H steel after a heat treatment in a tunnel
furnace or in a walking beam furnace.

Student:

Bc. Martin Chovanec

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Jaroslav Sojka

Ostrava 2017

Zadání bakalářské práce

Student: **Bc. Martin Chovanec**
Studijní program: **B3923 Materiálové inženýrství**
Studijní obor: **3911R036 Progresivní technické materiály**
Téma: **Srovnání vlastností oceli S355J2H po tepelném zpracování v tunelové nebo krokové peci**
A comparison of structure and properties of S355J2H steel after a heat treatment in a tunnel furnace or in a walking beam furnace
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod a cíl práce.
2. Teoretická část: a) Stručný popis válcovny trub a technologie výroby bezešvých trub; b) Žhání ocelí; c) Základní mechanické vlastnosti ocelí.
3. Experimentální část: a) Mechanické vlastnosti a struktura oceli S355J2H po normalizačním žhání v tunelové peci; b) Mechanické vlastnosti a struktura oceli S355J2H po normalizačním žhání v krokové peci; c) Srovnání mechanických vlastností a struktury v závislosti na typu použité pece.
4. Závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] CALLISTER, W. D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. 7. vyd. New York: John Wiley & Sons, 2007, 722 s. ISBN 0-471-73696-1.
[2] TOTTEN, G. E. *Steel Heat treatment, Metallurgy and technologies*. 2. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2007, 820 s. ISBN 0-8493-8455-9.
[3] *ASM Handbook, Volume 04, Heat treating*. Materials Park Ohio: ASM International, 2002. ISBN 0-87170-379-3.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Dr. Ing. Jaroslav Sojka**

Datum zadání: 30.11.2016

Datum odevzdání: 17.05.2017

prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám.

ZASADY.DOC

Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

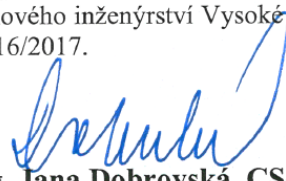
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2016/2017.

Ostrava 2. 11. 2016


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

ZASADY.DOC

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 19. 5. 2017

Martin Chovanec
podpis (jméno a příjmení studenta)

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu práce prof. Dr. Ing. Jaroslavu Sojkovi za odborné rady a vedení, konzultantovi Ing. Michaelu Squerzimu za praktickou pomoc při realizaci výzkumné části a dalším pracovníkům TŽ a.s. - Válcovny trub, konkrétně středisku technologie a válcovací tratě Malého Mannesmannu, při zpracování této bakalářské práce.

Taktéž bych chtěl poděkovat své rodině za čas, podmínky a trpělivost, které mi poskytla.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáním výsledných hodnot meze pevnosti, meze kluzu, tažnosti a absorbované energie včetně metalografických vlastností a chemického složení trubek reálných zakázek, vyrobených na středisku Malý Mannesmann provozu Válcovna trub- TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY a.s. (dále jen Válcovna trub) v závislosti na typu normalizační pece. Jako zkoumaný materiál byla vybrána ocel „C“ jakosti S355J2H. Zcela náhodně byly vybrány rozměry trubek o průměru 88,9 mm a 114,3 mm, oba ve stěnách 8,8 mm, 14,2 mm a 22,2 mm. Pro potřeby vyhodnocení mikrostruktury byla použita přeražená tělesa zkoušky rázem v ohybu, kde byly porovnány parametry jako je podíl fází, velikost zrna, rovnoměrnost struktury a řádkovitost.

Klíčová slova: žíhání; bezešvá trubka; struktura; mechanické zkoušky; absorbovaná energie; Mannesmann;

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the comparison of the resulting values of the ultimate tensile strength, yield strength, elongation at fracture and absorbed energy including metallographic properties and chemical composition of the real orders pipes produced at the Small Mannesmann plant of the Válcovna trub- TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY a.s. (hereinafter referred to as the Válcovna trub) depending on the type of the normalization annealing furnace. The "C" grade steel S355J2H was selected as the material under investigation. The dimensions of tubes with a diameter of 88.9 mm and 114.3 mm, both in the walls 8.8 mm, 14.2 mm and 22.2 mm, were randomly selected. For the purpose of evaluating the microstructure, the fractured bodies were used from notch toughness test, where parameters such as phase proportion, grain size, structure uniformity and degree of banding were compared.

Keywords: annealing; seamless pipe; structure; mechanical testing; absorbed energy; Mannesmann.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1. Úvod a cíl práce | 4 |
| 2. Teoretická část | 5 |
| 2. 1 Popis válcovny trub a výroby bezešvých trub Mannesmannovou metodou | 5 |
| 2. 2 Žihání ocelí | 10 |
| 2. 3 Základní mechanické vlastnosti ocelí a způsoby jejich stanovení..... | 16 |
| 3. Experimentální část | 21 |
| 3. 1 Mechanické vlastnosti a struktura oceli S355J2H po normalizačním žihání v průběžné peci..... | 21 |
| 3. 2 Mechanické vlastnosti a struktura oceli S355J2H po normalizačním žihání v krokové peci..... | 23 |
| 3. 3 Srovnání mechanických vlastností a struktury v závislosti na typu použité pece . | 26 |
| 4. Závěr | 35 |
| Seznam použité literatury | 36 |

1. Úvod a cíl práce

Technická úroveň Válcovny trub se odvíjí od neustále se zvyšujících nároků na užité vlastnosti trubek využívaných v nejrůznějších odvětvích od strojírenství, stavebnictví až po energetický, chemický či těžební průmysl. Pro udržení konkurence schopnosti ve světě je zapotřebí zavádět nové přístupy ať už automatizaci nebo modernizaci strojů a zařízení.

Od roku 1963 byla na provozu Malý Mannesmann v provozu normalizační tunelová pec, která však již nesplňovala moderní trend na zvyšující se vlastnosti trubek. Z tohoto důvodu docházelo k nevyhovujícím hodnotám absorbované energie zkoušky rázem v ohybu a s tím spojené další tepelné zpracování a zpoždění dodávek zákazníkům. Důvodem byla především nedostačující doba pobytu trubek v peci a její nedostatečné prohřátí. Proto bylo přistoupeno k nahrazení staré tunelové pece, pecí novou krokovou, která má tento problém eliminovat. V lednu roku 2017 byla tato pec uvedena do provozu.

V teoretické části je popsán závod Válcovny trub a způsob výroby bezešvých trubek Mannesmannovou metodou včetně tepelného zpracování, které je důležitým technologickým úkonem k dosažení požadovaných vlastností a popis parametrů obou zkoumaných pecí. Dále jsou zde popsány způsoby zkoušení mechanických a metalografických vlastností.

Cílem experimentální části této bakalářské práce je porovnat výsledné mechanické a metalografické vlastnosti různě tepelně zpracovaných trubek vyrobených na Malém Mannesmannu provozu Válcovny trub s ohledem na teploty na vstupu do obou pecí a doby pobytu v normalizačních pecích. Pro zkoumání byla použita ocel „C“ jakosti S355J2H, kdy samotný výzkum byl proveden na reálných zakázkách o průměrech trub 88,9 mm a 114,3 mm ve třech tloušťkách stěn pro každý průměr a to 8,8 mm, 14,2 mm a 22,2 mm. Mezi porovnávané vlastnosti byly vybrány mez kluzu, mez pevnosti, tažnost, absorbovaná energie, chemické složení, a výsledná mikrostruktura.

2. Teoretická část

V této části práce je stručně popsán závod Válcovny trub, na kterém je prováděna experimentální část, včetně popisu způsobu válcování bezešvých trub spolu s tepelným zpracováním. Jelikož se tato práce zabývá rozdíly vlastností v závislosti na typu pece pro normalizační žíhání, je tato část zaměřena převážně na žíhání a normalizaci včetně popisu obou pecí. Dále jsou zde popsány způsoby zkoušení vzorků z trubek Malého Mannesmannu a zkoumání struktury.

2.1 Popis válcovny trub a výroba bezešvých trub Mannesmannovou metodou

Provoz Válcovna trub zaujímá jak v České republice, ale i v Evropě významné postavení ve výrobě bezešvých ocelových trub válcovaných za tepla. Od roku 1918 až 1925 jsou v provozu dvě válcovací tratě, tzv. Malý a Velký Mannesmann. Válcovna prošla mnoha modernizacemi z důvodu stále vyšších požadavků zákazníků na kvalitu a vlastnosti trub. V současnosti se na Malém Mannesmannu válcuje sortiment od vnějšího průměru 60,3 mm až do průměru 159 mm s tloušťkami stěn od 5 mm do 36 mm. Na Velkém Mannesmannu je to sortiment od průměru 168 mm do 406,4 mm ve stěnách od 6,3 mm do 60 mm. Pro tyto účely se používají jak oceli uhlíkové, nelegované, legované, tak i vyšší jakosti jako např. 1026, Gr.1, Gr.6, 4140, X52N PSL2, X60Q PSL2, X65Q PSL2, L360N PSL2, L360NE PSL2, L415Q PSL2, L450Q PSL2, L415QE PSL2, L450QE PSL2, 20MnV6, E590K2, S460NH, S460NLH, P460N, E460K2, C45E, 42CrMo4, 16Mo3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10, 14MoV6-3, 15128, 15NiCuMoNb5-6-4, N80Q, L80 typ1, P110 a další [1].

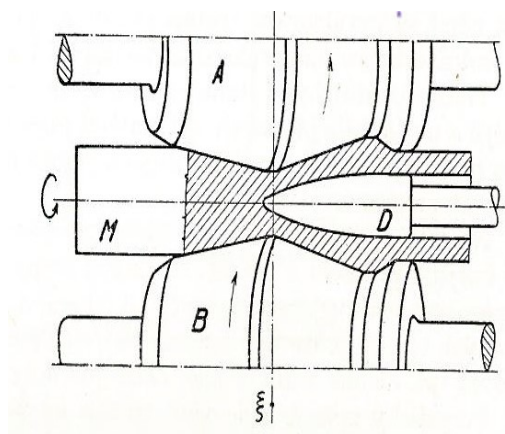
Výroba bezešvých trub ve Válcovně trub.

Výroba bezešvých trub začíná volbou vhodné vsázky, tedy průměru sochoru a požadované jakosti. Sochor popř. ingot má kruhový průřez a jeho příprava spočívá v nařezání popř. upálení na dané délky tak, aby po odválcování měla potřebné rozměry [2].

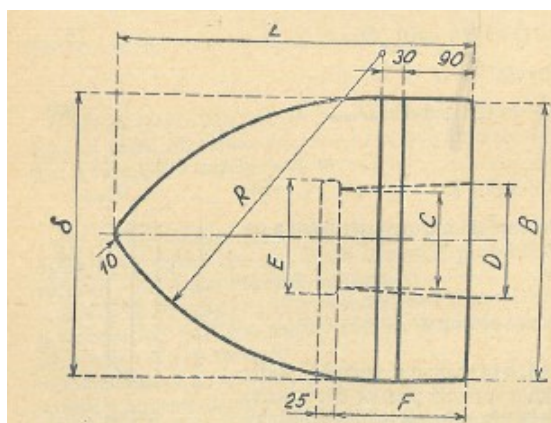
Takto připravený vsázkový materiál je pak umístěn do karuselové pece, tedy pece s otočnou prstencovou nístějí. Jedná se o rychlý ohřev vsázky plynou atmosférou, kde počítáme s délkou ohřevu 90 vteřin na 10 mm průměru. Způsob ohřevu je ovlivněn chemickým složením oceli. Teplota ohřevu v karuselové peci je cca 100 až 150 °C pod teplotou tání. Při děrování kosým válcováním je nutno počítat s tím, že se vlivem deformace na děrovací stolicí zvýší teplota uvnitř materiálu o 30 až 50 °C [3].

Když je materiál dostatečně prohřátý a dorazil k výstupu z pece, je dopraven po válnici na místo, kde je z jedné strany nadútlčikován do středu průměru sochoru pro potřeby děrování [2].

Děrování je výrobní proces, kterým docílíme, že z plného materiálu připravíme dutý předvalek kosým válcováním na děrovací stolicí. Uložení děrovacích válců (**viz Obr. 1**) je provedeno tak, že jejich osy spolu svírají ve svislé rovině určitý úhel. Osa děrování je vodorovná a půlí tento úhel. Ve vodorovné rovině jsou osy válců rovnoběžné. Průměty obou os do svislé roviny, která je proložena osou děrování, protínají se v bodě, který leží v tzv. rovině průchodu. Takto označujeme rovinu proloženou kolmo k ose děrování v nejužším místě mezi válci. Teprve před samou rovinou průchodu se uplatní též vliv trnu a materiál se příčně válcuje mezi válci a děrovací tyčí s děrovacím hrotem (**viz Obr. 2**). Při kosém válcování se uplatňuje vliv příčného válcování materiálu, tj. vliv tlaku válců na sochor. Tento tlak vyvolává uvnitř materiálu napětí, která vedou při dosažení určité hodnoty k trvalé deformaci [2].

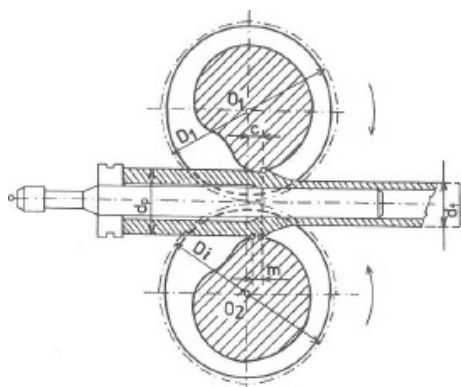


Obr. 1 Děrování na poutnické stolicí [3].

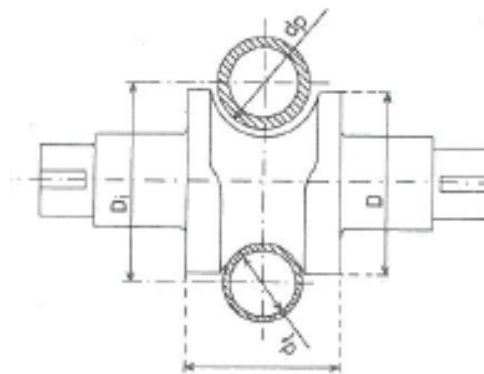


Obr. 2 Děrovací hrot pro poutnické stolice [2].

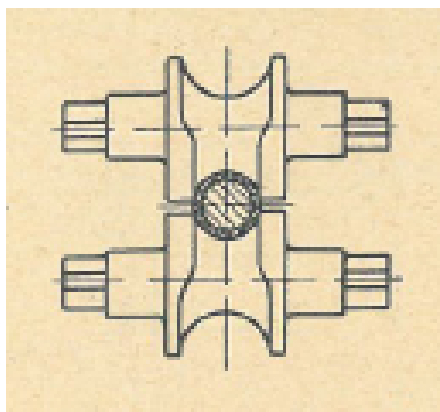
Samotné poutnické válcování je prakticky periodické podélné válcování v kruhovitém kalibru dvou válců na válcovém trnu. Průměr trubky určuje průměr kalibru poutního válce a válcový trn určuje tloušťku stěny popř. vnitřní průměr trubky. Proces tváření je proveden odválcováním kalibru válců po dutém předvalku, ve kterém je nasazen poutní trn uchycený v podávacím zařízení poutnické stolice. Válcování probíhá za otáčivého pohybu. Na počátku válcovací operace jsou válce proti sobě pootočený prázdným kalibrem, takže podávací zařízení válcovací stolice může trn s předvalkem posunout dopředu o míru „m“ (**viz Obr. 3**) posunu do záběru. Válce se otáčejí proti směru válcování, tedy proti směru výběhu válcované trubky ze stolice. V okamžiku, kdy záběrový úsek kalibru přijde do styku s dutým předvalkem, začne se trn posouvat nazpět a odválcovacím pohybem se dutý předvalek válcuje na trubku o vnějším průměru d_1 (**viz Obr. 4 a 5**) určeném průměrem hladicího úseku kalibru a o vnitřním průměru, který je určen průměrem trnu. Podélné deformace válcované trubky probíhají tedy ve šroubovici. Po odválcování postupuje trubka na pilu, kde se odřežou nekolmé konce, a dále postupuje na chladník, kde se sníží teplota na požadovanou hodnotu. Po ochlazení na vzduchu jde trubka do normalizační pece, kde se vyrovná teplota po celé délce a postupuje ke kalibrovacímu stroji, kde se v kruhovitých kalibrech válců podélným válcováním vyrovná její povrch a zpřesní vnější průměr [3].



Obr. 3 Schéma poutnického válcování [3].



Obr. 4 Schéma poutního válce [3].



Obr. 5 Trubka v poutnických válcích [2].

Použití bezešvých trub:

Nejrozšířenější jsou trubky kolmo uříznuté s hladkými a s odjehlenými konci (**viz Obr. 6**). Používají se převážně pro konstrukční účely, strojní opracování, energetiku nebo jako mechanické trubky [2].



Obr. 6 Hladké trubky bez opracovaných konců.

U trubek se silnější stěnou, které se používají pro dálkový rozvod zemního plynu nebo nafty, se oba konce zkosí (**viz Obr. 8**) z důvodu spojování trubek svařováním pro lepší provaření materiálu [2].

Pro tento druh použití se používají oceli s jakostí L175 – L415 a X42 – X60 [1].

Dalším druhem trubek vyráběných na Válcovně trub jsou ty se závitovými konci (**viz Obr. 7**), které nacházejí své uplatnění převážně v těžbě nafty, popř. pro rozvod plynu a jiných médií. Tyto trubky jsou pak spojovány k sobě nátrubky (**viz Obr. 9**). Toto spojení musí vykazovat těsnost a velkou snášenlivost vůči namáhání v tahu působícímu v ose trubky [2].

Pro tyto účely se používají jakosti H40, J-55, K-55, L-55, L80 Typ1, N80, N80 Typ1 nebo P110 [1].



Obr. 7. Trubky se závitem.



Obr. 8. Trubky s úkosem.



Obr. 9. Nátrubky našroubované na závítovaných trubkách.

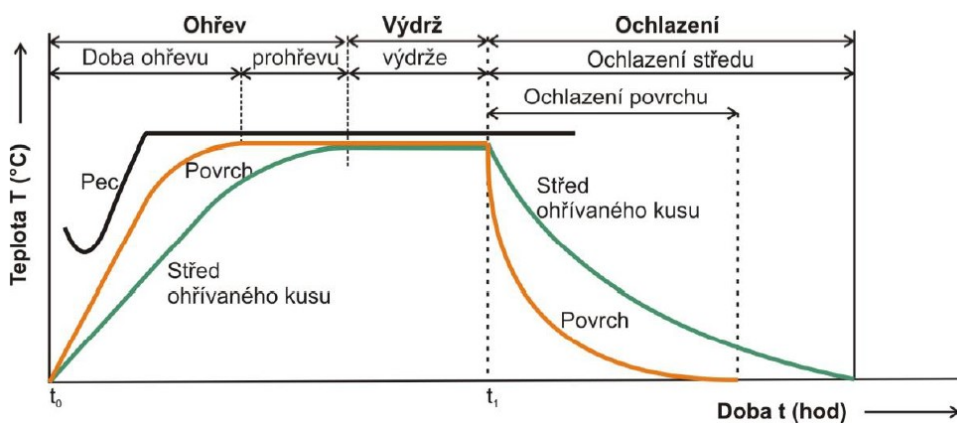
Bezešvé trubky vyráběné ve Válcovně trub jsou využívány pro nejrůznější odvětví a účely:

- Strojírenství a automobilový průmysl- nápravy, rámy, nárazníky, tiskárenské válce, vodící kladky, statory, výložníky.
- Stavebnictví- mikropiloty, injektáže, trakční stožáry, konstrukce budov, střech, stadiónů.
- Energetika- kotle, tepelné výměníky, tlakové stanice, parovody.
- Chemické a geologické odvětví- těžba a rozvody ropy, zemního plynu, vody, geologický průzkum [1].

2.2 Žihání ocelí

Chemické složení a především struktura materiálu ovlivňují vlastnosti kovových materiálů. Strukturou je myšlen tvar, velikost, množství a rozložení jednotlivých fází. Požadovaná struktura vyráběného materiálu se získává především tepelným zpracováním.

Tepelná zpracování jsou ve své podstatě takové postupy, při kterých materiál ohříváme na určitou teplotu, na které musí materiál určitou dobu vydržet, a poté ochlazujeme určitou rychlostí (**viz Obr. 10**), abychom dosáhli požadovaných vlastností. Materiál musí být rovnoměrně vyhřátý na teplotu žihání, která se liší dle způsobu žihání a druhu materiálu, vydrží na teplotě a pomalém ochlazení. Tyto operace se dle požadavků na vlastnosti materiálu mohou opakovat několikrát za sebou vždy za jiných podmínek [4], [5].



Obr. 10. Obecný diagram tepelného zpracování [6].

Žihání můžeme rozlišit podle toho, jestli při něm probíhá fázová přeměna, na žihání s překrystalizací a bez překrystalizace. Na **Obr. 11**, jsou zobrazeny teplotní průběhy níže uvedených tepelných zpracování v diagramu Fe-C.

Při žihání bez překrystalizace teplota žihání nepřekročí teplotu A_{c1} (výjimku tvoří žihání na měkko u nadeutektoidních ocelí). Rozsah fázových přeměn je v tomto případě nevýznamný. Poměr feritu a cementitu (mimo terciálního) se v oceli nemění. Mění se však tvar a velikost zrn, koncentrace a rozdělení mřížkových poruch a velikost vnitřního pnutí [6].

Mezi žihání bez překrystalizace patří rekrytalizační žihání, kterým odstraňujeme zpevnění po tváření za studena. Teploty se pohybují mezi 600 až 650 °C u uhlíkových ocelí, u feritických ocelí okolo 800 °C a austenitické oceli se žihají na teplotách rozpouštěcího žihání

1000 °C. Zvolíme-li nižší teploty žíhání po přesně danou dobu, docílíme díky zotavení snížení vnitřního pnutí a křehkosti, zároveň zachováme částečné zpevnění. [7].

Dále zde patří žíhání na odstranění pnutí, které se aplikuje po úkonech, po kterých vzniká vnitřní pnutí uvnitř materiálu. Jedná se zejména o úkony, jako je svařování, rychlé a nestejnosměrné ochlazování materiálu se složitějšími tvary nebo silnějších průřezů, při tváření za tepla po místním ohřevu, větším obrábění a jiné. Teploty žíhání bývají 600 až 650 °C, kdy se vnitřní pnutí vyrovnává plastickou deformací. Pokud je materiál rovnoměrně prohřátý v celém objemu, stačí krátká doba výdrže na teplotě, maximálně 2 hodiny. Aby nevzniklo znovu vnitřní pnutí, musí se materiál ochlazovat v peci pomalu na teplotu 150 až 400 °C dle tvárnosti oceli. Tato teplota je také závislá na velikosti a tvaru materiálu [8].

Dalším zástupcem žíhání bez překrystalizace je žíhání na měkko. Jedná se o dlouhodobé žíhání materiálu okolo kritické teploty A_1 s pomalým ochlazováním. Tímto postupem se dosáhne sferoidizace lamelárního cementitu v zrnitý (žíhání na zrnitý perlit) a výsledná struktura je velmi měkká, houževnatá a dobře obrobitelná. Toto žíhání se využívá již u ocelí se středním obsahem uhlíku od 0,4 až 0,5 % C. Žíháním na měkko však nedosáhneme zjemnění zrna. Ideálním způsobem tohoto žíhání se označuje ohřátí materiálu těsně nad teplotu A_{c1} asi 2 až 4 hodiny s velmi pomalým ochlazováním až k teplotě 600 °C s dalším libovolným ochlazováním. Žíhání na měkko používáme zejména ke zlepšení obrobitelnosti slitinových ocelí s vyšším podílem uhlíku, které jsou špatně obrobitelné, např. kuličková ložiska. Má však značný význam také pro nástrojové oceli, které po zakalení mají v přítomnosti sferoidisovaného karbidu i při vysoké tvrdosti a pevnosti vyhovující houževnatost a dobré řezné vlastnosti [8].

Při žíhání s překrystalizací dochází k úplné nebo téměř úplné přeměně výchozí feriticko-cementitické struktury na austenit. Podautektoidní oceli se žíhají většinou nad teplotu A_{c3} , nadeutektoidní nad A_{cm} nebo mezi teplotami A_{c1} a A_{cm} . Získá se větší rovnoměrnost struktury a odstraní se chemické nehomogenita oceli [6].

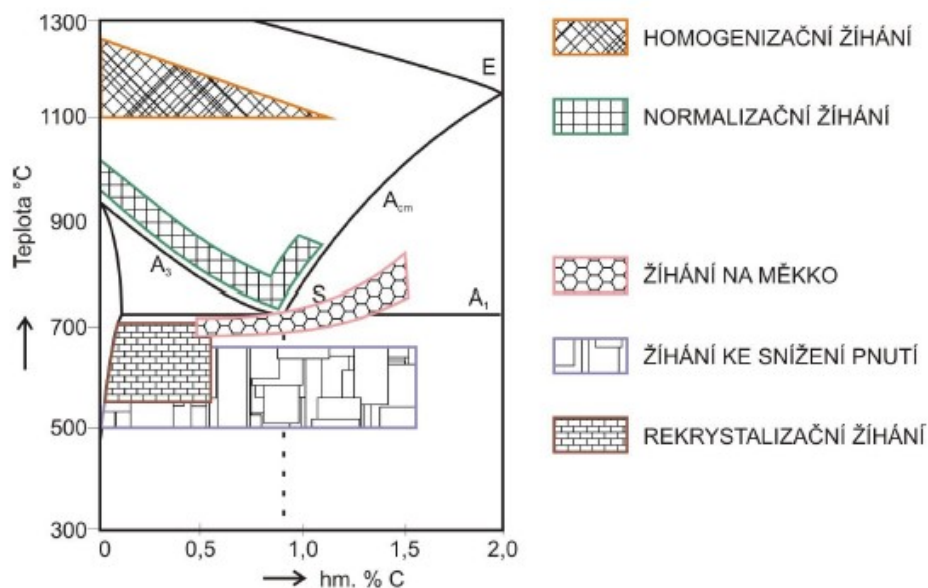
Patří zde homogenizační žíhání, jehož cílem je vyrovnání nestejnosměrnosti chemického složení oceli difúzí. Tato heterogenita chemického složení vzniká již v průběhu tuhnutí, kdy se ocel nachází mezi teplotou likvidu a solidu. Homogenizační žíhání je tedy ohřev materiálu na teplotu vyšší než A_3 a A_{cm} (1000 až 1250 °C), při dostatečně dlouhé době

výdrže na teplotě 6 hodin i více a pomalé ochlazování. Používá se také před tvářením, kdy postačí prodloužení výdrže na válcovací teplotě o 2 až 4 hodiny. Toto vyvolává na povrchu oceli vznik okují a oduhličení. Chemické složení se na již tvářené oceli vyrovnává daleko rychleji. Pro zjemnění zrna je pak žádoucí další tvářením [8].

Mezi nejnovější způsoby žíhání s překrystalizací patří izotermické žíhání. Jde o ohřev materiálu na teplotu o 30 až 50 °C výše než A_{c3} , výdrž na teplotě s následným ochlazením na teplotu vzniku perlitu, následuje výdrž na této teplotě až do konce přeměny austenitu na perlit s dalším ochlazováním. Při správné teplotě rozpadu docílíme vzniku jemných karbidů ve struktuře. Používá se nejčastěji u malých předmětů, kde je možná velmi rychlá změna teploty [9].

Tato práce je však spojena s normalizačním žíháním. Cílem je zejména zjemnění hrubého zrna, které vzniklo už při lití, dlouhodobém žíhání nebo tvářením za vysokých teplot. Z důvodu různých průřezů je doválcovací teplota, protváření i rychlost ochlazování rozdílná i v částech jednoho materiálu. Účelem tedy je vytvořit zrno jemnější i stejnosměrně velké. Normalizační žíhání podeutektoidních ocelí je ohřev na teplotu o 30 až 50 °C nad bodem přeměny A_{c3} a následující volné ochlazení na vzduchu. Oceli nadeutektoidní se zpravidla normalizačně nežíhají. Pokud se má normalizací odstranit karbidická síťová na hranicích zrn, způsobené pomalým ochlazováním po tvářením, je vhodná normalizační teplota asi 30 °C nad bodem A_{cm} , a pak rychlé ochlazení až na teplotu pod 700 °C. Další ochlazování musí být pomalé, aby se austenit přeměnil na perlit a nenastalo zakalení, které by při tak vysoké austenitizační teplotě mělo za následek velká pnutí a vznik trhlin. K rychlému ochlazení, které potlačí vylučování nadeutektoidních karbidů na hranicích zrn mezi teplotami A_{cm} a A_{r1} , stačí u předmětů malých rozměrů ochlazení vzduchu, u předmětů s většími rozměry (přibližně o průměru větším než 100 mm) nestačí ani krátkodobé ochlazení ve vodě. Má-li se normalizačním žíháním nadeutektoidních ocelí zjemnit zrno, provádí se ohřev jen nad teplotu A_{c1} s následujícím ochlazením na vzduchu. Při ohřevu na teplotu A_{cm} zrno zbytečně hrubne a při pomalém ochlazení se vyloučí karbidy rozpuštěné v austenitu na hranicích zrn a vytvoří se zde karbidická síť. Toto žíhání používáme jako přípravu pro kalení, ale i jako konečnou operaci materiálů, které jsou pak používány u málo namáhaných součástí hlavně z uhlíkových ocelí. K odstranění vnitřního pnutí, snížení pevnosti a zlepšení plastických vlastností oceli, musíme materiál dále žíhat při teplotách 500 až 600 °C. Překrystalizací tedy docílíme zjemnění zrna. V případě dalšího normalizačního žíhání se zrno ještě více zjemňuje. Používají

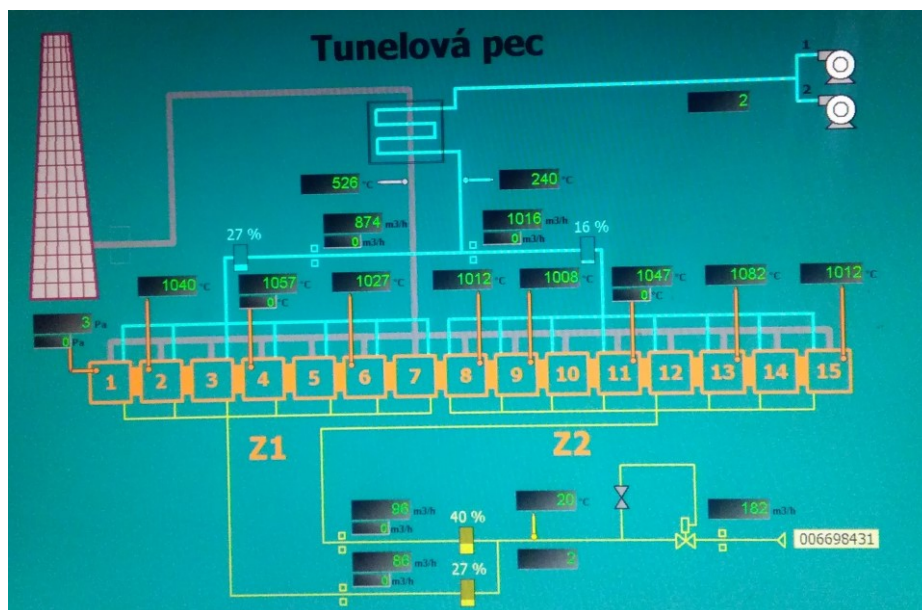
se pece ke kalení, ale i žíhací s výjezdnou nístějí. Při sériové výrobě to jsou zejména pece průběžné [9].



Obr. 11. Schéma režimů žíhání v diagramu Fe-C [6].

Jelikož se tato práce zabývá rozdíly vlastností oceli v závislosti na typu normalizační pece, je zapotřebí zde tyto pece, kterými prošly zkoumané vzorky, popsat.

Tunelová pec zobrazená na **Obr. 13**, byla uvedena do provozu roku 1963 a výrobcem bylo VŽKG. Pec je dlouhá 25,92 m, a 0,5 m široká. Je složena z 15 kusů článků o 60 hořících uspořádaných tangenciálně po 30 z obou stran ve dvou regulovatelných zónách jak je vidět na **Obr. 12**. Zdrojem tepla je zemní plyn a maximální teplota v peci je 1000 °C. K výstavbě nové krokové pece došlo z důvodu nedostatečného ohřevu trubek v peci a nedosažení požadovaných teplot na výstupu a s tím i související nevyhovující zkoušky absorbované energie [10].

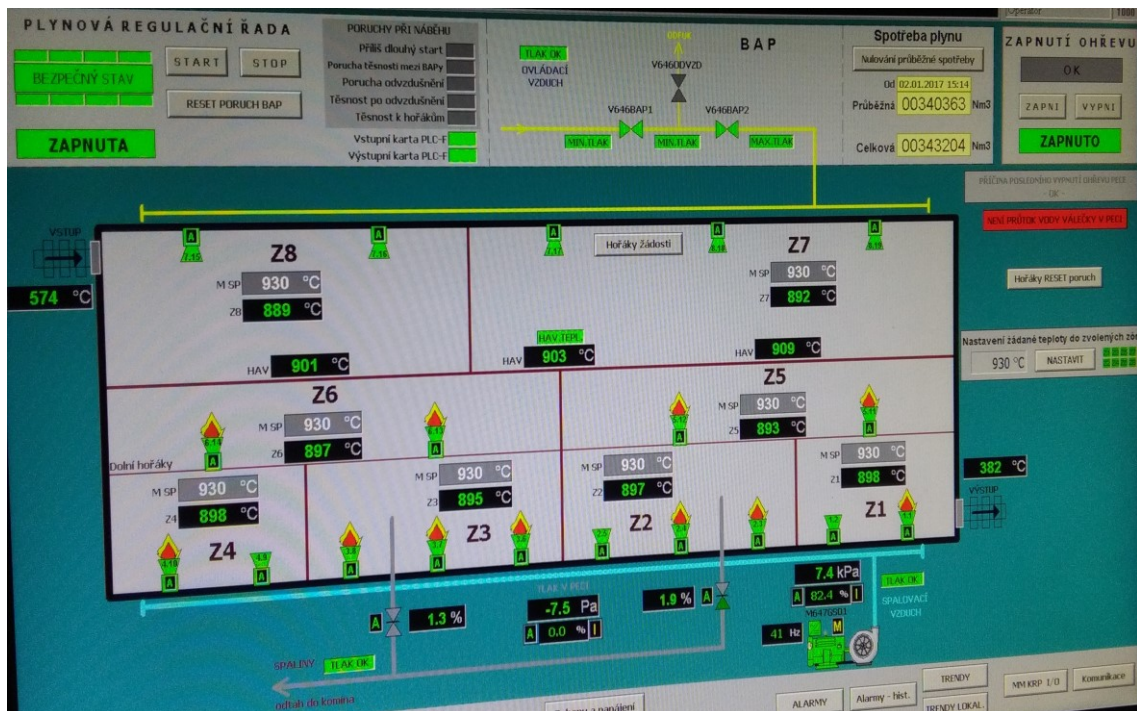


Obr. 12. Schéma tunelové pece.



Obr. 13. Tunelová pec.

Kroková pec, která je zobrazena na **Obr. 15**, byla uvedena do provozu v lednu 2017, a má vnitřní rozměry 16 x 3,64 m a je vybavena 19 kusy vysokorychlostních rekuperačních hořáků o výkonu každého z nich 120 kW. Hořáky jsou rozděleny do 8 regulovatelných zón (viz **Obr. 14**). Maximální teplota v peci je stejně jako u průběžné pece 1000 °C a zdrojem tepla je zemní plyn. Tudiž zde můžeme počítat s delším ohřevem trubek [10].



Obr. 14. Schéma krokové pece.



Obr. 15. Kroková pec.

2.3 Základní mechanické vlastnosti ocelí a způsoby jejich stanovení

Jedním ze základních podkladů pro pevnostní výpočet a konstrukci strojních dílců a zařízení je soubor napěťových a deformačních materiálových charakteristik, které označujeme jako mechanické vlastnosti. Díky nim můžeme popsat chování materiálů za působení vnějších sil či jiných vlivů a také můžeme vybrat takový materiál, který bude odpovídat technickým i ekonomickým měřítkům. U meze pevnosti či meze kluzu, lze mechanické vlastnosti vyjádřit pomocí jednoduchých vztahů, nebo je lze přepočítat i na jiné rozměry a tvary materiálů. U vrubové houževnatosti zase popisují chování materiálu za určitých podmínek bez možnosti převodu na jiná zkušební tělesa. Obecně platí, že větší část zkoušek bývá prováděna za pokojových teplot. U materiálů, které jsou určeny pro práci za vyšších teplot, se zkouší v pracovních podmínkách.

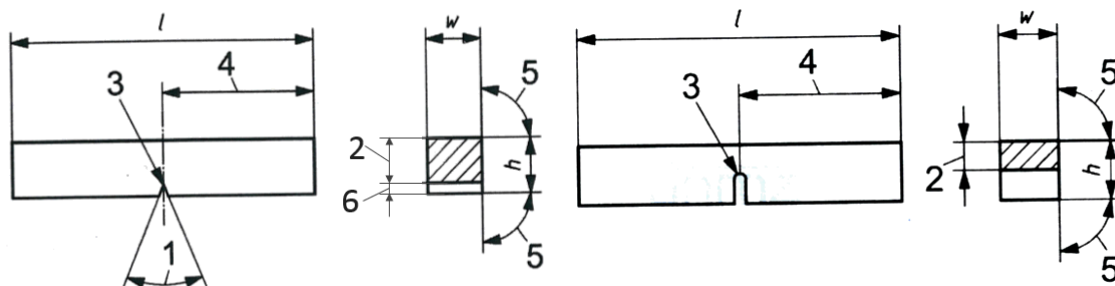
Základní mechanické zkoušky včetně zkušebních těles a způsobu vyhodnocování výsledků jsou normovány, což zajišťuje jejich reprodukovatelnost a porovnatelnost výsledků z různých zkušeben [11].

Z důvodu nestejnorodosti a anizotropních vlastností materiálu je pro výsledky zkoušek důležité i místo a způsob odběru vzorku. Metody odběru vzorků musí charakterizovat vlastnosti materiálu, tedy průměrné vlastnosti, nebo vymezené oblasti materiálu, které jsou z pohledu technologie nejdůležitější a rozhodující pro provozní namáhání a životnost materiálu. U materiálů tvářených se vzorky odebírají dle směru tváření podélně, příčně atd. Tvar, rozměry a jakost obrobení jsou dány normou [11].

Zkouška rázem v ohybu

Tato dynamická zkouška spočívá v přeražení zkušebního vzorku, který má na jedné straně vyfrézovaný vrub, jedním úderem Charpyho kyvadlovým kladivem. Účelem je stanovení spotřebované práce [Joul], která je potřebná k přeražení vzorku. Je to tedy odolnost materiálu proti rázovému namáhání a je ukazatelem houževnatosti nebo křehkosti materiálu. Absorbovaná energie K ovlivňují faktory jako např. teplota zkoušení, struktura materiálu, rychlost deformace nebo rozměry zkušebního tělesa a tvar vrubu.

Používají se zkušební tělesa s „U“ a „V“ vrubem vyfrézovaným uprostřed vzorku jak je vidět na **Obr. 16**. Zkušební těleso je čtvercového průřezu o rozměrech 10 x 10 x 55 mm. „V“ vrub je hluboký 2 mm a svírá úhel 45°. „U“ vrub je hluboký 5 mm o poloměru zaoblení kořene 1mm. V případě, že nelze z materiálu vyrobit vzorek o těchto rozměrech, může být vyroben o šířce 7,5 mm nebo 5 mm, kdy vrub je vytvořen na užší straně vzorku [12].



Obr. 16. Zkušební těleso s „V“ a „U“ vrubem [13].

kde:

l- délka tělesa

w- šířka tělesa

2- výška pod vrubem

4- vzdálenost roviny symetrie vrubu

6- hloubka vrubu

h- výška tělesa

1- úhel vrubu

3- poloměr zakřivení kořene

5- úhel mezi přilehlými povrchy

Samotné zkoušení probíhá opřením vzorku o dvě opěry, kdy vrub musí být na opačné straně úderu kladiva. Zdvihnuté kladivo se uvolní a přerazí vzorek. Spotřebuje se absorbovaná energie, která je označena KV popř. KU (dle typu vrubu) [J].

Zkouška tahem

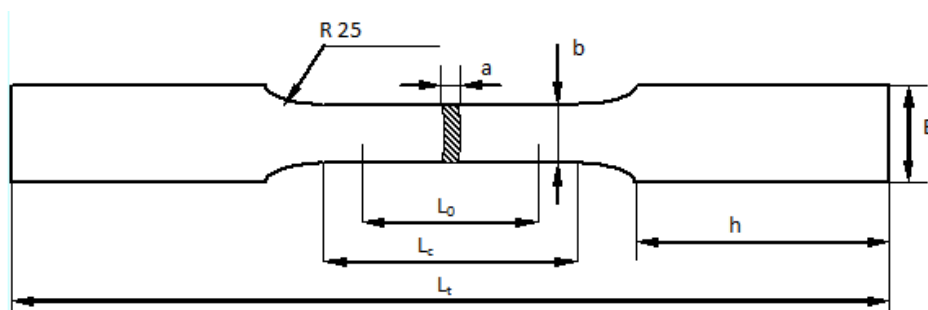
Jedná se o zkušební metodu statickou, která je nejznámější a nejuznávanější díky své jednoduchosti a účelnosti pro stanovení mechanických vlastností. Jedná se o deformaci zkušební tyče jednoosým tahem, převážně až do přetržení. Takto můžeme vyhodnotit i více napětíových a deformačních hodnot uvedených v normě. Tato zkouška probíhá při teplotách okolí mezi 10 až 35 °C, není-li uvedena jiná teplota zkoušení.

Zkoušení probíhá na trhačím stroji, který tvoří pevný rám, kde v horní části je umístěn siloměr. Zkušební tyč je upnuta jedním koncem v horní hlavě se siloměrem a druhým koncem

ke spodní hlavě, kde se nachází pohyblivý střední příčník. Pohybem středního příčníku dojde k zatěžování a deformaci zkušební tyče. Tímto pohybem docílíme prodloužení zkušebního tělesa.

Zkušební tyč je obvykle připravena obráběním vzorku odebraného z výrobku, i když vzorky o stálém příčném průřezu (profily, tyče, dráty) mohou být podrobeny zkoušce bez obrobení [12].

U trubek je vyrobena z podélného nebo příčného pásu dle tloušťky stěny (**viz Obr. 17**), popř. obráběním, jedná-li se o zkušební tyč kruhovou (**viz Obr. 18**).



Obr. 17. Ploché zkušební těleso [13].

kde:

L_0 - počáteční měřená délka

L_c - zkoušená délka

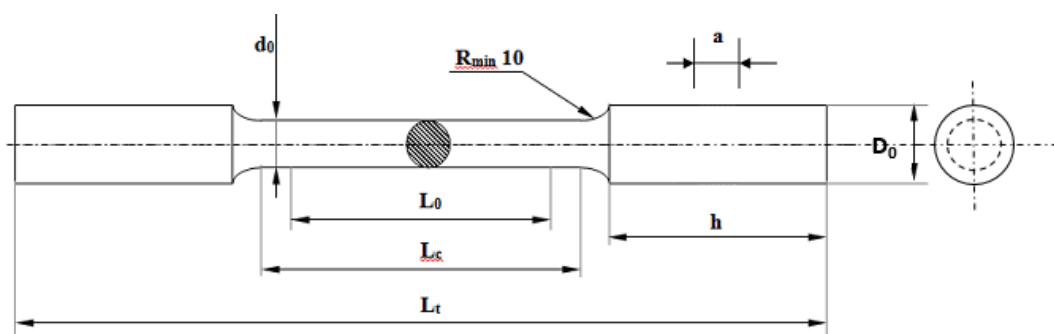
L_t - délka zkušební vzorku

b - počáteční šířka

B - šířka zkušební tyče

h - výška hlavy

R - poloměr zaoblení



Obr. 18. Kruhové zkušební těleso [13].

kde:

L_0 - počáteční měřená délka

L_t - celková délka

a- počáteční výška

R- poloměr zaoblení

L_c - zkoušená délka

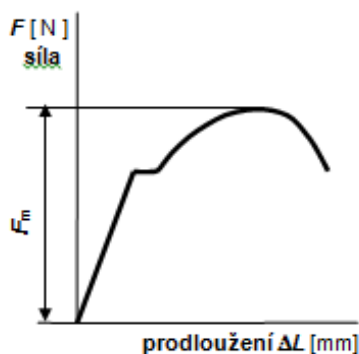
d_0 - počáteční průměr

h- výška hlavy

D_0 - šířka opracované tyče

Mez kluzu je definována jako napětí, při kterém se zkoušený materiál začíná plasticky deformovat. Charakter přechodu mezi elastickou a plastickou deformací je dán typem materiálu, mohou se vyskytovat v závislosti $F - \Delta L$ [12].

Pevnost v tahu se označuje R_m a je definován jako napětí odpovídající největšímu zatížení F_m , jak je vidět na **Obr. 19**.



$$\text{Pevnost v tahu } R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [N.mm}^{-2}\text{]}$$

Obr. 19. Graf určení pevnosti v tahu [12].

Tažnost se označuje písmenem A a jedná se o trvalé prodloužení měrné délky po přetržení $L_u - L_0$. Výsledek se vyjadřuje v %.

Kontrakci označujeme písmenem Z a jde o změnu příčného průřezu po přetržení zkušební tyče $S_0 - S_u$. Vyjadřuje se také v % [12].

Metody zkoumání struktury

Za strukturou oceli považujeme její krystalovou stavbu na lomové ploše, popř. na speciálně upraveném řezu. Je-li krystalová stavba pozorovatelná při malých zvětšeních např. lupou nebo očima, jedná se o makrostrukturu. Potřebujeme-li k pozorování zvětšení větší než 50x, jde o mikrostrukturu. Vlastnosti kovů a slitin je také dána podstatou vnitřní stavby a umístění atomů v krystalové mřížce. Studium struktury umožňuje vyhodnotit vhodnost materiálu i příčiny vad a jejich rozsah.

Bc. Chovanec, M. *Srovnání vlastností oceli S355J2H po tepelném zpracování v tunelové nebo krokové peci*. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava, 2017.

Ke zkoumání struktury se používají kromě makroskopického pozorování také světelné a elektronové mikroskopy. Makroskopickým pozorováním posuzujeme hrubé detaily struktury jako např. lomovou plochu, hrubost krystalu, větší vady atd. Detailní pozorování krystalové struktury však dosáhneme pouze difrakcí příhodného záření na upravenou plochu zkoušeného materiálu, který nesmí být tepelně ani mechanicky ovlivněn [14].

3 Experimentální část

V této části práce jsou uvedeny a vyhodnoceny výsledky mechanických a metalografických vzorků z trubek Malého Mannesmannu válcovaných způsobem popsáním v kapitole 2.1. Pro tento výzkum byla vybrána ocel „C“ jakosti S355J2H o průměru 88,9 mm a 114,3 mm ve třech různých tloušťkách stěn 8,8 mm, 14,2 mm a 22,2 mm. V kapitole 3.1 jsou uvedeny výsledné chemické a mechanické vlastnosti z tunelové pece a v kapitole 3.2 obdobné výsledky z krokové pece. V kapitole 3.3 se nachází srovnání časového a teplotního průběhu zpracování trubek, mechanických vlastností a struktury v závislosti na typu normalizační pece.

3.1 Mechanické vlastnosti a struktura oceli S355J2H po normalizačním žíhání v tunelové peci

V Tab. 1 až 3 se nachází chemické složení materiálu. V Tab. 4 jsou výsledky tahových zkoušek, tažnosti a absorbované energie pro pr. 88,9 mm. Stejné uspořádání je i v Tab. 5 až 8 pro pr. 114,3 mm.

Chemické složení vzorků z trubek průměru 88,9 mm jakosti S355J2H.

Jak je vidět, tak chemické složení je téměř totožné u všech tří zkoušených vzorků, avšak vzorek 7199 z Tab. 2 má mírně nižší obsah síry a vyšší podíl fosforu a molybdenu, v porovnání se vzorky z Tab. 1 a 3.

Tab. 1. Chemické složení vzorku č. 7218- tloušťka stěny 8,8 mm (v hm. %).

| Vzorek | CEQ | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
|--------|-------|-------|------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 7218 | 0,421 | 0,18 | 1,15 | 0,2 | 0,015 | 0,007 | 0,04 | 0,03 | 0,18 | 0,007 | 0,035 |
| | Ti | Alc | W | Nb | B | N | Sn | H | As | Co | Sb |
| | 0,001 | 0,029 | 0,01 | 0,002 | 0,0005 | 0,01 | 0,004 | 0,0003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |

Tab. 2. Chemické složení vzorku č. 7199- tloušťka stěny 14,2 mm (v hm. %).

| Vzorek | CEQ | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
|--------|-------|-------|------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 7199 | 0,409 | 0,17 | 1,14 | 0,19 | 0,021 | 0,005 | 0,03 | 0,03 | 0,18 | 0,009 | 0,036 |
| | Ti | Alc | W | Nb | B | N | Sn | H | As | Co | Sb |
| | 0,001 | 0,029 | 0,01 | 0,001 | 0,0006 | 0,0095 | 0,003 | 0,0003 | 0,005 | 0,003 | 0,003 |

Tab. 3. Chemické složení vzorku č. 7180- tloušťka stěny 22,2 mm (v hm. %).

| Vzorek | CEQ | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
|--------|-------|-------|------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 7180 | 0,421 | 0,18 | 1,15 | 0,2 | 0,015 | 0,007 | 0,04 | 0,03 | 0,18 | 0,007 | 0,035 |
| | Ti | Alc | W | Nb | B | N | Sn | H | As | Co | Sb |
| | 0,001 | 0,029 | 0,01 | 0,002 | 0,0005 | 0,01 | 0,004 | 0,0003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |

Výsledky zkoušky tahem a zkoušky rázem v ohybu.

Pozn.: u tloušťky stěny trubek 8,8 mm byl vzorek pro absorbovanou energii vyroben v rozměru 5x 10 mm.

Tab. 4. Výsledky zkoušek tahem a rázem v ohybu pro pr. 88,9 mm zpracovaný v tunelové peci.

| Vzorek | Průměr trubky (mm) | Tloušťka stěny (mm) | Zkouška tahem | | | Zkouška rázem v ohybu | | | | |
|--------|--------------------|---------------------|-----------------|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|---------------------------------|-----|-----|
| | | | Mez kluzu (MPa) | Mez pevnosti (MPa) | Tažnost (%) | Zkušební teplota (°C) | Směr vláken | Hodnoty absorbované energie (J) | | |
| 7218 | 88,9 | 8,8 | 382 | 564 | 31,3 | -20 | L | 93 | 66 | 99 |
| 7199 | 88,9 | 14,2 | 393 | 548 | 30,5 | -20 | L | 93 | 135 | 143 |
| 7180 | 88,9 | 22,2 | 374 | 559 | 28,3 | -20 | T | 40 | 35 | 40 |

Chemické složení vzorků z trubek průměru 114,3 mm jakosti S355J2H.

Zde se chemické složení liší z největší části u vzorku 7047 z **Tab. 7**, kde je znatelně vyšší obsah mědi, niklu, molybdenu a cínu, ve srovnání se vzorky z **Tab. 5** a **6**.

Tab. 5. Chemické složení vzorku č. 7063- tloušťka stěny 8,8 mm (v hm. %).

| Vzorek | CEQ | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
|--------|-------|-------|------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 7063 | 0,408 | 0,17 | 1,14 | 0,19 | 0,016 | 0,007 | 0,03 | 0,02 | 0,18 | 0,006 | 0,036 |
| | Ti | Alc | W | Nb | B | N | Sn | H | As | Co | Sb |
| | 0,001 | 0,033 | 0,01 | 0,001 | 0,0004 | 0,0106 | 0,003 | 0,0003 | 0,003 | 0,003 | 0,002 |

Tab. 6. Chemické složení vzorku č. 7039- tloušťka stěny 14,2 mm (v hm. %).

| Vzorek | CEQ | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
|--------|-------|-------|------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 7039 | 0,425 | 0,18 | 1,17 | 0,19 | 0,013 | 0,005 | 0,03 | 0,02 | 0,19 | 0,006 | 0,037 |
| | Ti | Alc | W | Nb | B | N | Sn | H | As | Co | Sb |
| | 0,001 | 0,034 | 0,01 | 0,001 | 0,0005 | 0,0105 | 0,003 | 0,0003 | 0,002 | 0,003 | 0,002 |

Tab. 7. Chemické složení vzorku č. 7047- tloušťka stěny 22,2 mm (v hm. %).

| Vzorek | CEQ | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
|--------|-------|-------|-----|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 7047 | 0,41 | 0,17 | 1,1 | 0,22 | 0,011 | 0,005 | 0,16 | 0,08 | 0,17 | 0,01 | 0,022 |
| | Ti | Alc | W | Nb | B | N | Sn | H | As | Co | Sb |
| | 0,001 | 0,021 | 0 | 0,001 | 0,0001 | 0,009 | 0,011 | 0,0003 | 0,005 | 0,008 | 0,002 |

Výsledky zkoušky tahem a zkoušky rázem v ohybu.**Tab. 8.** Výsledky zkoušek tahem a rázem v ohybu pro pr. 114,3 mm zpracovaný v tunelové peci.

| Vzorek | Průměr trubky (mm) | Tloušťka stěny (mm) | Zkouška tahem | | | Zkouška rázem v ohybu | | | | |
|--------|--------------------|---------------------|-----------------|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|---------------------------------|-----|----|
| | | | Mez kluzu (MPa) | Mez pevnosti (MPa) | Tažnost (%) | Zkušební teplota (°C) | Směr vláken | Hodnoty absorbované energie (J) | | |
| 7063 | 114,3 | 8,8 | 353 | 544 | 28,8 | -20 | L | 86 | 106 | 94 |
| 7039 | 114,3 | 14,2 | 398 | 542 | 24 | -20 | T | 56 | 61 | 43 |
| 7047 | 114,3 | 22,2 | 402 | 576 | 24,6 | -20 | T | 35 | 48 | 24 |

3.2 Mechanické vlastnosti a struktura oceli S355J2H po normalizačním žíhání v krokové peci

Obdobné uspořádání tabulek, jako u vzorků zpracovaných v tunelové peci v **kap. 3.1**, jsou i **Tab. 9 až 16** zpracované v krokové peci.

Chemické složení vzorků z trubek průměru 88,9 mm jakosti S355J2H.

Chemické složení vzorků zpracované v krokové peci se liší převážně u vzorku 636 z **Tab. 12**, kde je vyšší podíl síry, manganu a nižší podíl fosforu, arzenu, boru a dusíku, ve srovnání se vzorky z **Tab. 11 a 13**.

Tab. 11. Chemické složení vzorku č. 608- tloušťka stěny 8,8 mm (v hm. %).

| Vzorek | CEQ | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
|--------|-------|-------|------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 608 | 0,409 | 0,17 | 1,14 | 0,19 | 0,021 | 0,005 | 0,03 | 0,03 | 0,18 | 0,009 | 0,036 |
| | Ti | Alc | W | Nb | B | N | Sn | H | As | Co | Sb |
| | 0,001 | 0,029 | 0,01 | 0,001 | 0,0006 | 0,0095 | 0,003 | 0,0003 | 0,005 | 0,003 | 0,003 |

Tab. 12. Chemické složení vzorku č. 636- tloušťka stěny 14,2 mm (v hm. %).

| Vzorek | CEQ | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
|--------|-------|-------|------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 636 | 0,413 | 0,17 | 1,16 | 0,19 | 0,015 | 0,008 | 0,03 | 0,02 | 0,19 | 0,008 | 0,036 |
| | Ti | Alc | W | Nb | B | N | Sn | H | As | Co | Sb |
| | 0,001 | 0,029 | 0,01 | 0,001 | 0,0004 | 0,0087 | 0,003 | 0,0003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |

Tab. 13. Chemické složení vzorku č. 655- tloušťka stěny 22,2 mm (v hm. %).

| Vzorek | CEQ | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
|--------|-------|-------|------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 655 | 0,409 | 0,17 | 1,14 | 0,19 | 0,021 | 0,005 | 0,03 | 0,03 | 0,18 | 0,009 | 0,036 |
| | Ti | Alc | W | Nb | B | N | Sn | H | As | Co | Sb |
| | 0,001 | 0,029 | 0,01 | 0,001 | 0,0006 | 0,0095 | 0,003 | 0,0003 | 0,005 | 0,003 | 0,003 |

Výsledky zkoušky tahem a zkoušky rázem v ohybu.

Tab. 14. Výsledky zkoušek tahem a rázem v ohybu pro pr. 88,9 mm zpracovaný v krokové peci.

| Vzorek | Průměr trubky (mm) | Tloušťka stěny (mm) | Zkouška tahem | | | Zkouška rázem v ohybu | | | | |
|--------|--------------------|---------------------|-----------------|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|---------------------------------|-----|-----|
| | | | Mez kluzu (MPa) | Mez pevnosti (MPa) | Tažnost (%) | Zkušební teplota (°C) | Směr vláken | Hodnoty absorbované energie (J) | | |
| 608 | 88,9 | 8,8 | 359 | 541 | 30,7 | -20 | L | 84 | 99 | 103 |
| 636 | 88,9 | 14,2 | 361 | 536 | 28,5 | -20 | L | 154 | 149 | 161 |
| 655 | 88,9 | 22,2 | 387 | 554 | 26,4 | -20 | T | 52 | 44 | 55 |

Chemické složení vzorků z trubek průměru 114,3 mm jakosti S355J2H.

Chemické složení se liší mírně u vzorku 198 v **Tab. 17**, který má vyšší obsah manganu, chromu a dusíku oproti ostatním vzorkům z **Tab. 15 a 16**.

Tab. 15. Chemické složení vzorku č. 164- tloušťka stěny 8,8 mm (v hm. %).

| Vzorek | CEQ | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
|--------|-------|-------|------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 164 | 0,403 | 0,17 | 1,12 | 0,19 | 0,013 | 0,003 | 0,02 | 0,01 | 0,18 | 0,004 | 0,036 |
| | Ti | Alc | W | Nb | B | N | Sn | H | As | Co | Sb |
| | 0,001 | 0,025 | 0,01 | 0,001 | 0,0004 | 0,0073 | 0,002 | 0,0003 | 0,002 | 0,003 | 0,002 |

Tab. 16. Chemické složení vzorku č. 193- tloušťka stěny 14,2 mm (v hm. %).

| Vzorek | CEQ | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
|--------|-------|-------|------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 193 | 0,403 | 0,17 | 1,12 | 0,19 | 0,013 | 0,003 | 0,02 | 0,01 | 0,18 | 0,004 | 0,036 |
| | Ti | Alc | W | Nb | B | N | Sn | H | As | Co | Sb |
| | 0,001 | 0,025 | 0,01 | 0,001 | 0,0004 | 0,0073 | 0,002 | 0,0003 | 0,002 | 0,003 | 0,002 |

Tab. 17. Chemické složení vzorku č. 198- tloušťka stěny 22,2 mm (v hm. %).

| Vzorek | CEQ | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
|--------|-------|-------|------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 198 | 0,411 | 0,17 | 1,14 | 0,2 | 0,012 | 0,002 | 0,02 | 0,02 | 0,2 | 0,004 | 0,037 |
| | Ti | Alc | W | Nb | B | N | Sn | H | As | Co | Sb |
| | 0,001 | 0,029 | 0,01 | 0,001 | 0,0004 | 0,0081 | 0,003 | 0,0003 | 0,003 | 0,004 | 0,001 |

Výsledky zkoušky tahem a zkoušky rázem v ohybu.

Tab. 18. Výsledky zkoušek tahem a rázem v ohybu pro pr. 114,3 mm zpracovaný v krokové peci.

| Vzorek | Průměr trubky (mm) | Tloušťka stěny (mm) | Zkouška tahem | | | Zkouška rázem v ohybu | | | | |
|--------|--------------------|---------------------|-----------------|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|---------------------------------|-----|-----|
| | | | Mez kluzu (MPa) | Mez pevnosti (MPa) | Tažnost (%) | Zkušební teplota (°C) | Směr vláken | Hodnoty absorbované energie (J) | | |
| 164 | 114,3 | 8,8 | 383 | 540 | 31,2 | -20 | L | 97 | 104 | 110 |
| 193 | 114,3 | 14,2 | 389 | 526 | 28,3 | -20 | T | 131 | 131 | 133 |
| 198 | 114,3 | 22,2 | 366 | 520 | 30,8 | -20 | T | 141 | 134 | 132 |

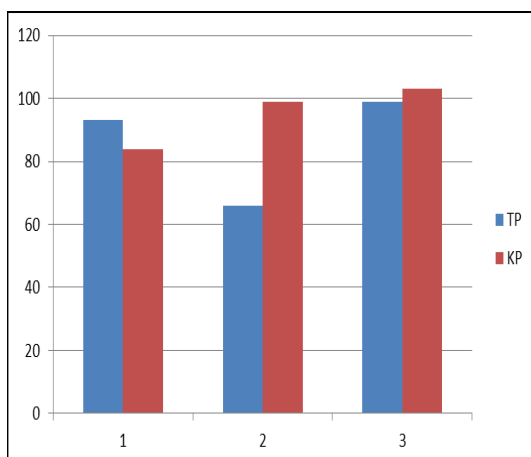
3.3 Srovnání mechanických vlastností a struktury v závislosti na typu pece

Při srovnání teplotního průběhu zpracování trubek v tunelové a krokové peci považují za největší rozdíl fakt, že trubky zpracované v tunelové peci měly teplotu na vstupu do pece o cca 100 až 200 °C (dle tloušťky stěny) vyšší, než trubky tepelně zpracované v krokové peci, kde se teplota pohybuje kolem 620 °C. Taktéž doba pobytu trubek v peci se liší. V krokové peci je trubka 4x až 5x delší dobu dle tloušťky stěny.

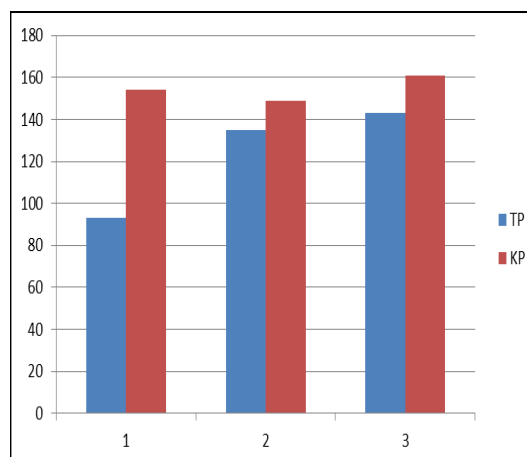
Minimální požadavek na hodnotu absorbované energie je při -20 °C hodnota 27 J, což splňují všechny zkoumané vzorky, kromě vzorku 7047, což je pr. 114,3x 22,2 mm zpracovaný v tunelové peci. Dle této normy však jsou po zprůměrování všechny vzorky vyhovující.

Z níže uvedených **grafů 1 až 6** vyplývá, že vzorky zpracované v krokové peci (zkratka KP) mají rovnoměrnější i vyšší hodnoty absorbované energie než vzorky zpracované v tunelové peci (zkratka TP). Toto se projevuje zejména u silnějších stěn.

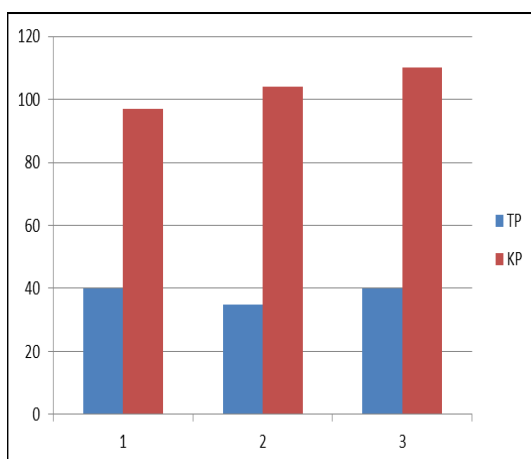
Srovnání hodnot absorbované energie dle průměru a tloušťky stěny.



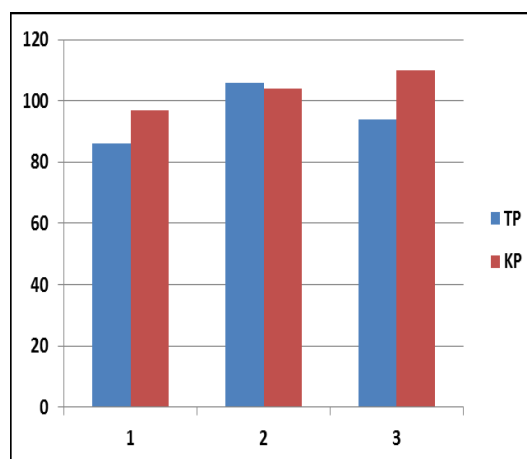
Graf 1. Pr. 88,9x 8,8 mm.



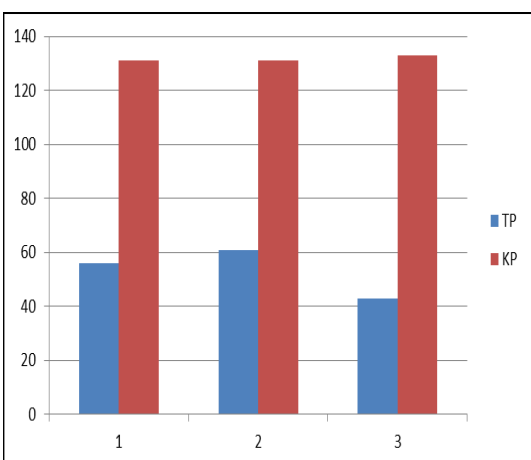
Graf 2. Pr. 88,9x 14,2 mm.



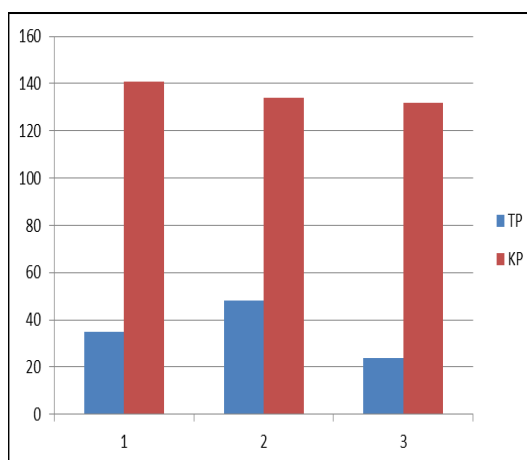
Graf 3. Pr. 88,9x 22,2 mm.



Graf 4. Pr. 114,3x 8,8 mm.



Graf 5. Pr. 114,3x 14,2 mm.



Graf 6. Pr. 114,3x 22,2 mm.

Vyhodnocení metalografických zkoušek.

Ke zkoumání mikrostruktury byly použity přeražené tělesa zkoušky rázem v ohybu, orientované v souladu s daným požadavkem na reálnou zakázku. Tyto vzorky byly zalisovány do bakelitu, a poté byl proveden podélný metalografický výbrus. Lisování do této směsi je prováděno z důvodu čitelnosti štítku s označením vzorku. Před samotným zkoušením byly vzorky přeleštěny a naleptány 10% nitalem (roztok kyseliny dusičné s alkoholem). Na vzorcích se provedlo hodnocení podílů fází, feritického zrna a velikost perlitických bloků, jak je vidět v **Tab. 19 a 20**, srovnávací metodou dle technické předlohy ASTM E112. Podíl fází byl určen pomocí odhadu v optickém mikroskopu, který byl dále ověřen pomocí obrazové analýzy na softwaru Quuick photo 3.1. V blízkosti místa lomu bylo provedeno i zhodnocení řádkovitosti struktury.

Tab. 19. Struktura vzorků jakosti S355J2H zpracovaných v tunelové peci.

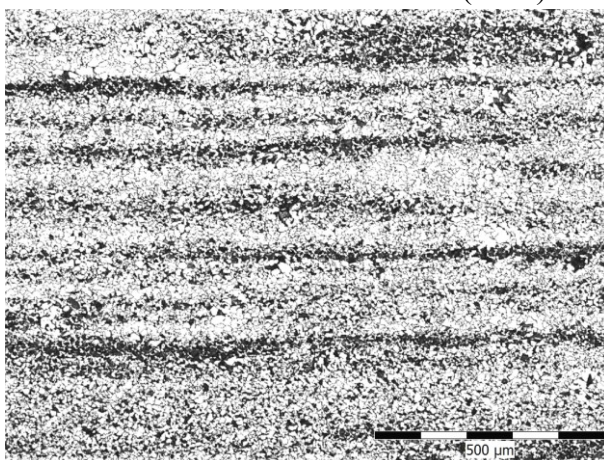
| Průměr [mm] | Tl. stěny [mm] | Vzorek | Podíl fází [%] | Velikost zrna [ASTM E112] | | |
|----------------|-------------------|--------|----------------------|---------------------------|---------------------|--------------|
| | | | | ferit | perlitické bloky | poznámka |
| 88,9 | 8,8 | 7218 | 70 ferit + 30 perlit | 9 | 9 | místy vel. 8 |
| | 14,2 | 7199 | 70 ferit + 30 perlit | 8 | 8 | - |
| | 22,2 | 7180 | 70 ferit + 30 perlit | 7,5 | 7,5 | |
| 114,3 | 8,8 | 7063 | 70 ferit + 30 perlit | 9,5 | 9,5 | - |
| | 14,2 | 7039 | 70 ferit + 30 perlit | 7,5 | 7,5 | - |
| | 22,2 | 7047 | 70 ferit + 30 perlit | 7 | 7 | - |

Tab. 20. Struktura vzorků jakosti S355J2H zpracovaných v krokové peci.

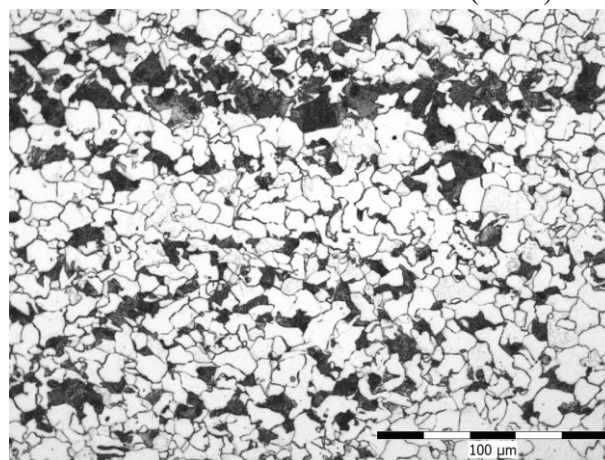
| Průměr [mm] | Tl. Stěny [mm] | Vzorek | Podíl fází [%] | Velikost zrna [ASTM E112] | | |
|----------------|-------------------|--------|----------------------|---------------------------|---------------------|---|
| | | | | ferit | perlitické bloky | poznámka |
| 88,9 | 8,8 | 608 | 70 ferit + 30 perlit | 8 | 8 | shluky 6,5 + pozůstatky z lici str. |
| | 14,2 | 636 | 70 ferit + 30 perlit | 8 | 8 | místy vel. 7,5 |
| | 22,2 | 655 | 70 ferit + 30 perlit | 7,5 | 7,5 | místy vel.7 |
| 114,3 | 8,8 | 164 | 70 ferit + 30 perlit | 9 | 9 | - |
| | 14,2 | 193 | 70 ferit + 30 perlit | 7,5 | 7,5 | - |
| | 22,2 | 198 | 70 ferit + 30 perlit | 8 | 7 | - |

Jak vyplývá z výše uvedených tabulek č. 19 a 20, tak všechny zkoumané vzorky mají mikrostrukturu tvořenou feritem a perlitem. Velikost feritických zrn a perlitických bloků se při porovnání s technickou předlohou dle ASTM E112, nacházela v jemném stupni od 7 po 9,5 viz. **Obr. 20 až 43**. U vzorku 608 je vidět na **Obr. 23** nerovnoměrná struktura s výraznými shluky hrubších zrn a bloků. Pravděpodobně se jedná o pozůstatky z původní lící struktury. Na **Obr. 29** můžeme vidět v některých zrnech drobné tmavší útvary, které nelze jednoznačně definovat. Může se jednat o precipitát nebo artefakt vzniklý při přípravě vzorku.

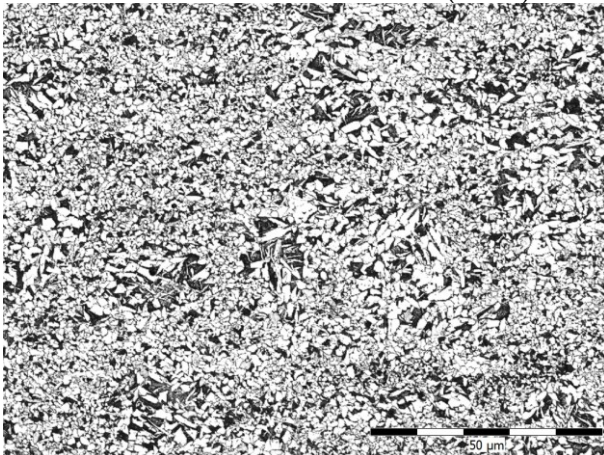
Obr. 20. Struktura č.vz. 7218 (100x)



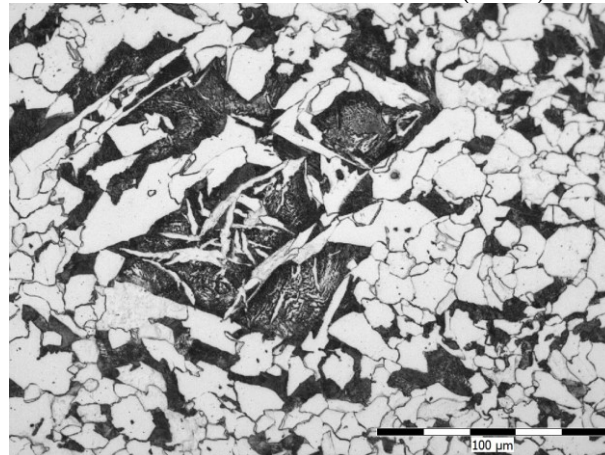
Obr. 21. Struktura č. vz. 7218 (500x)

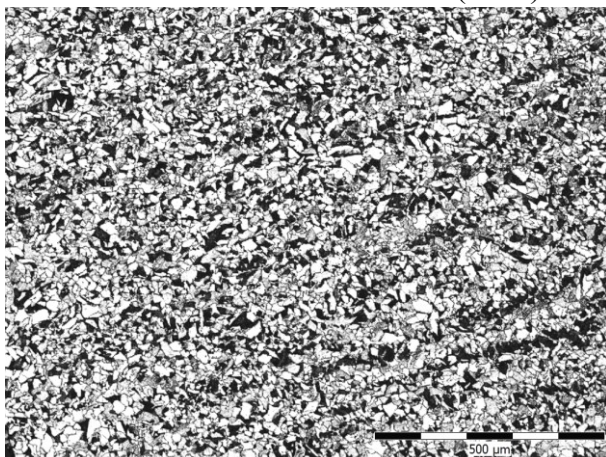
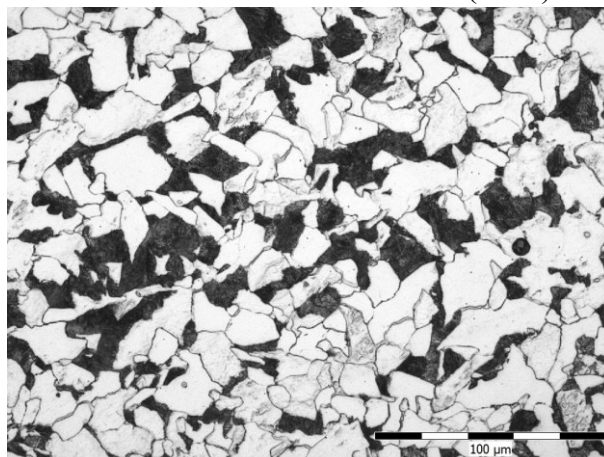
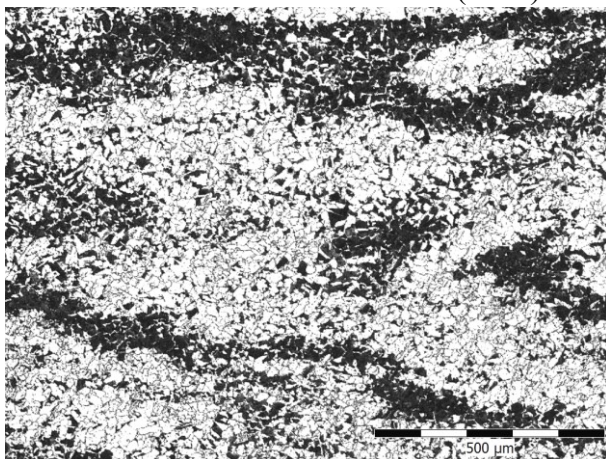
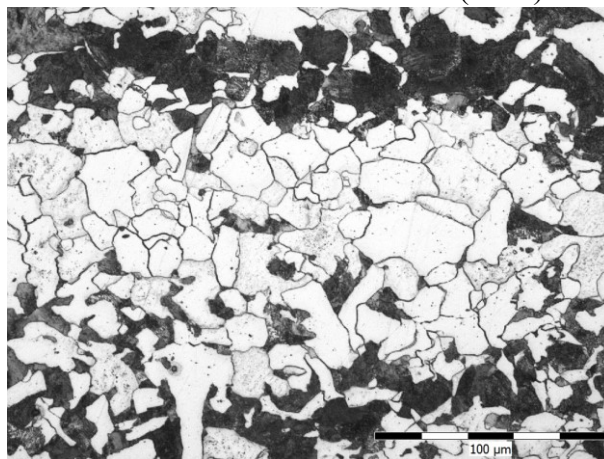
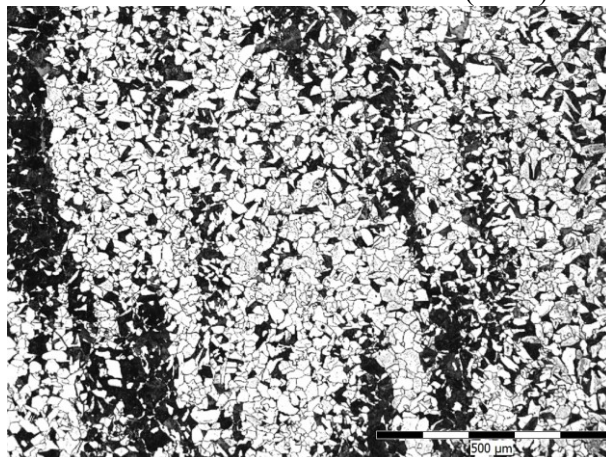
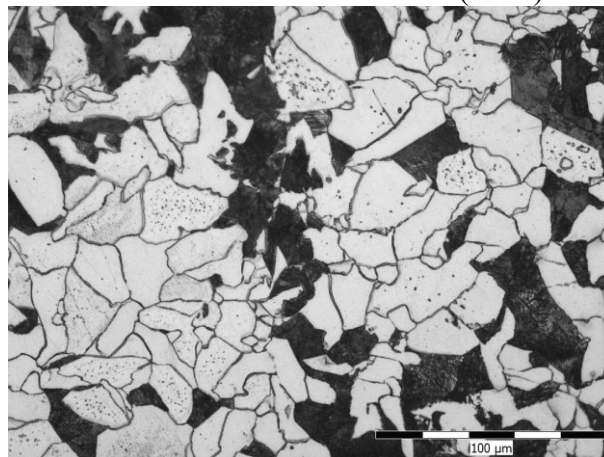


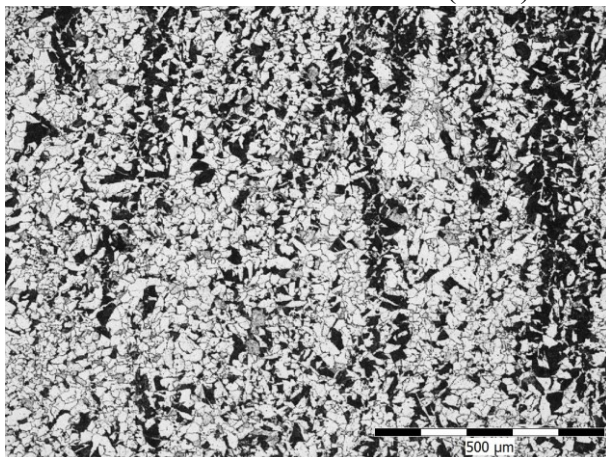
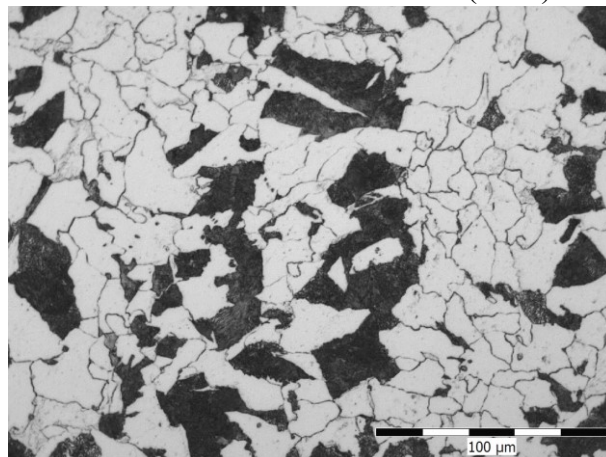
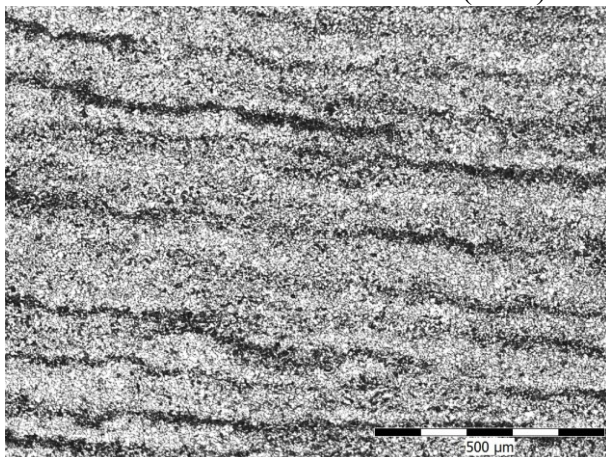
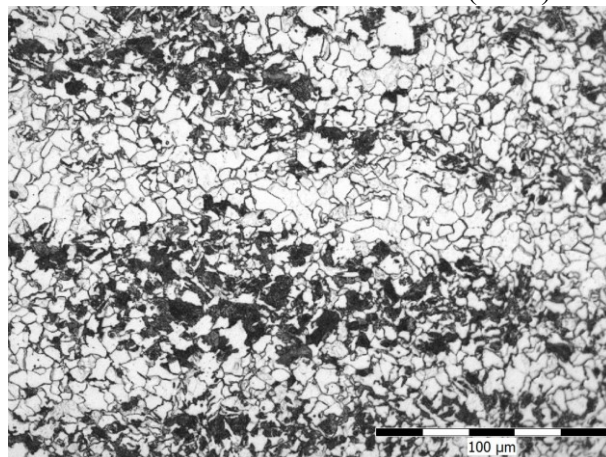
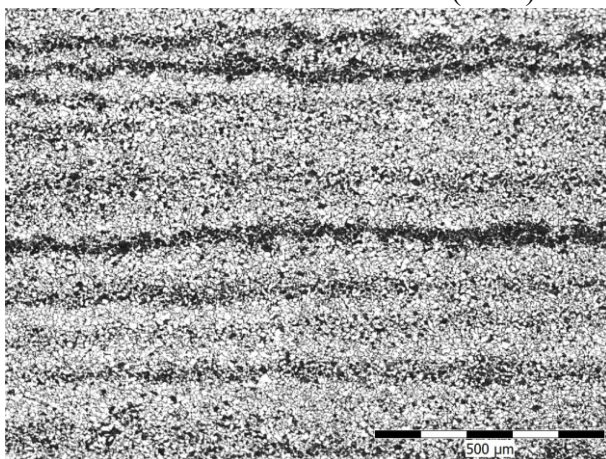
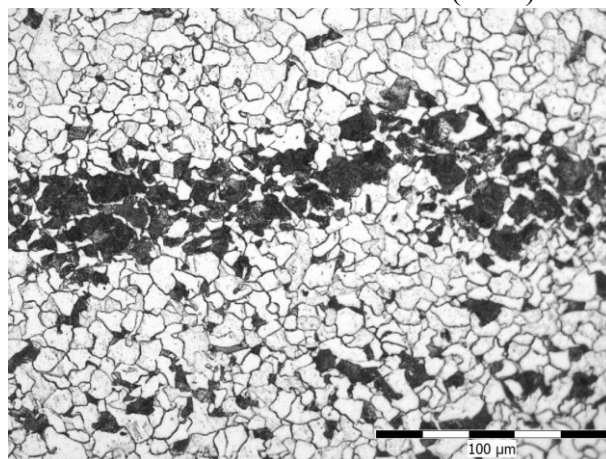
Obr. 22. Struktura č.vz. 608 (100x)

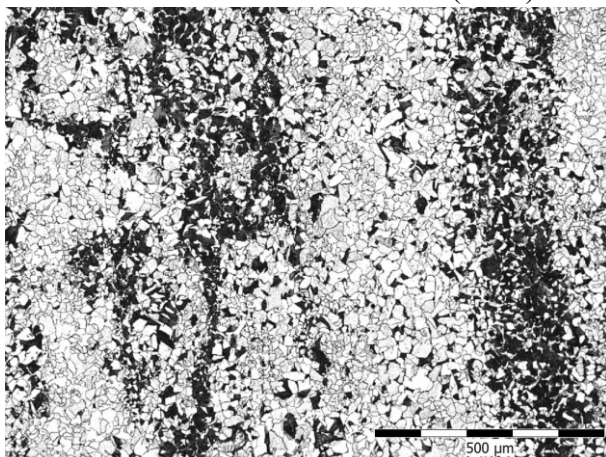
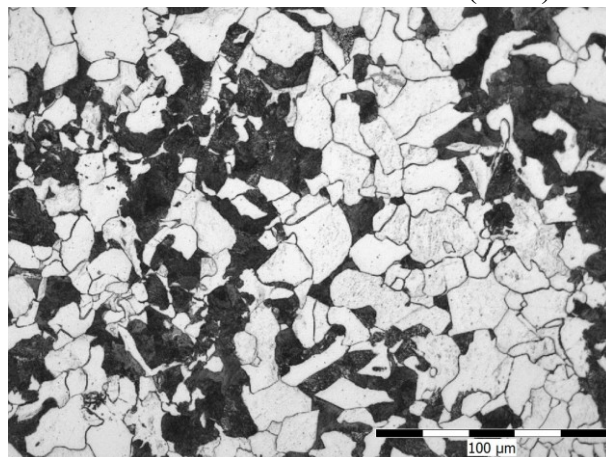
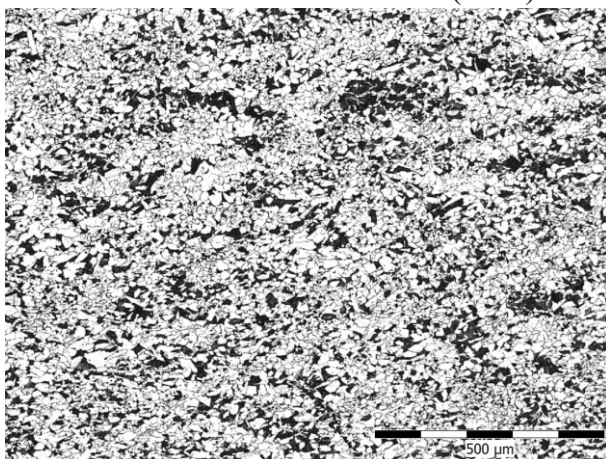
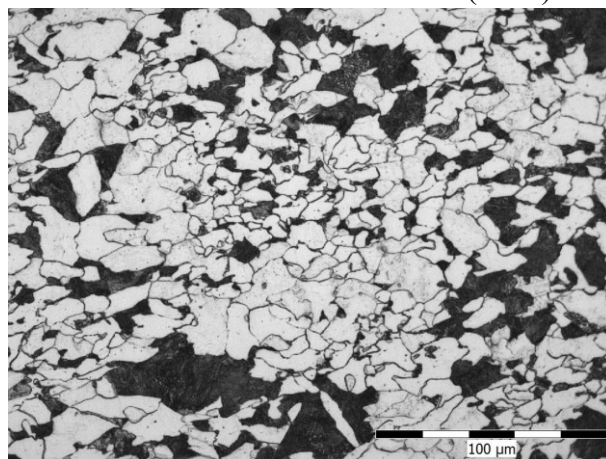
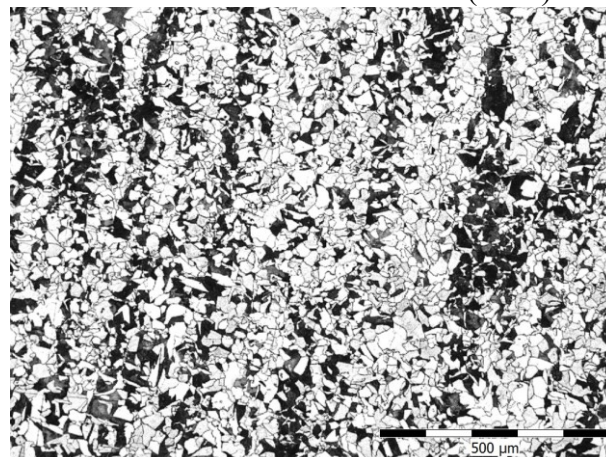
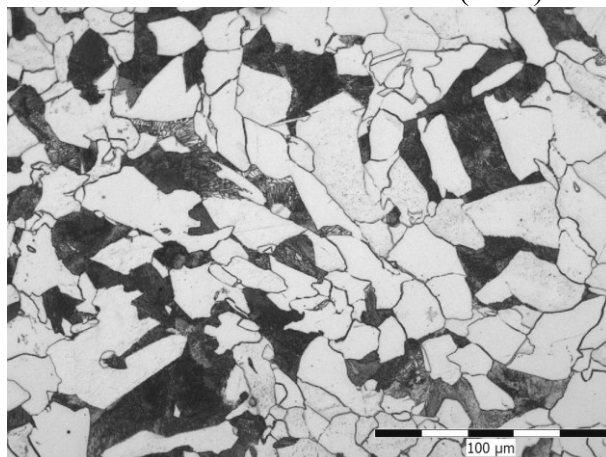


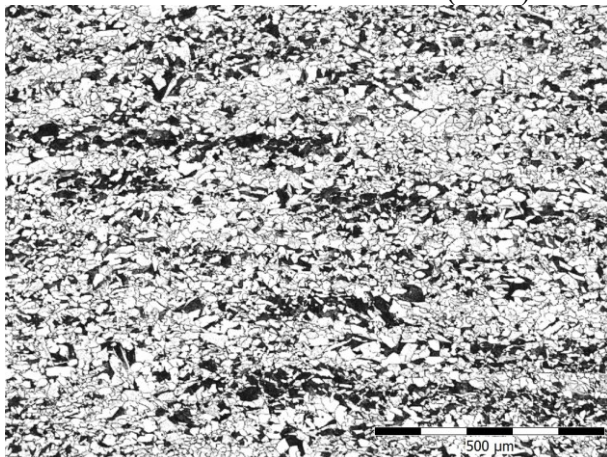
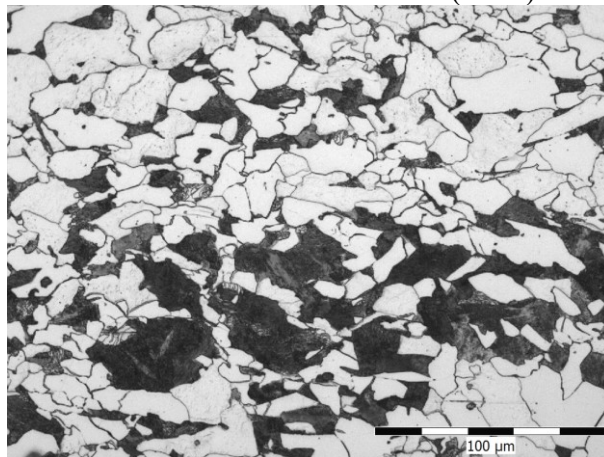
Obr. 23. Struktura č. vz. 608 (500x)



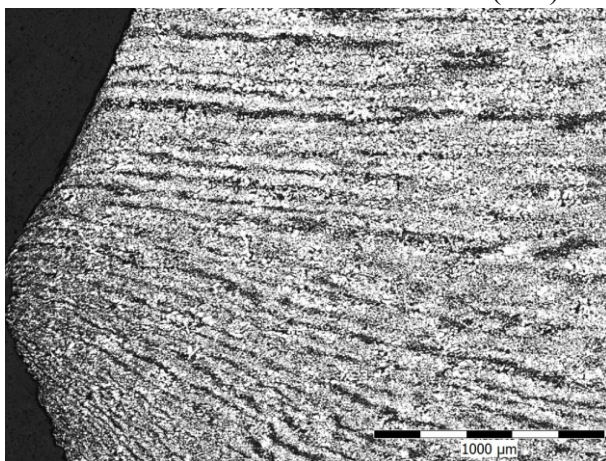
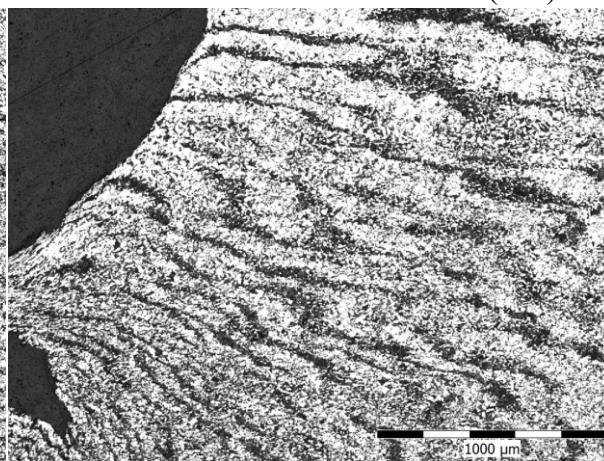
Obr. 24. Struktura č.vz. 7199 (100x)**Obr. 25.** Struktura č. vz. 7199 (500x)**Obr. 26.** Struktura č.vz. 636 (100x)**Obr. 27.** Struktura č. vz. 636 (500x)**Obr. 28.** Struktura č.vz. 7180 (100x)**Obr. 29.** Struktura č. vz. 7180 (500x)

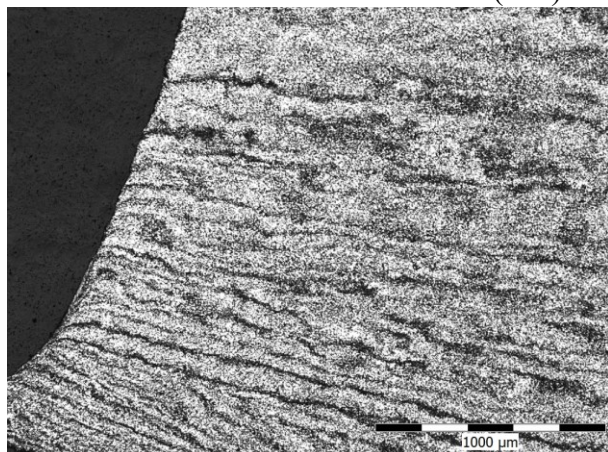
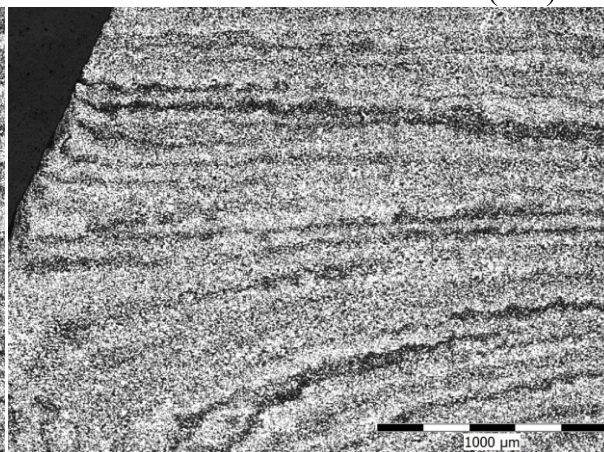
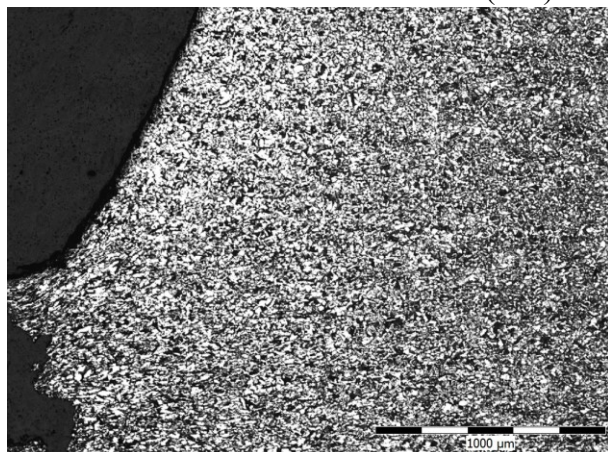
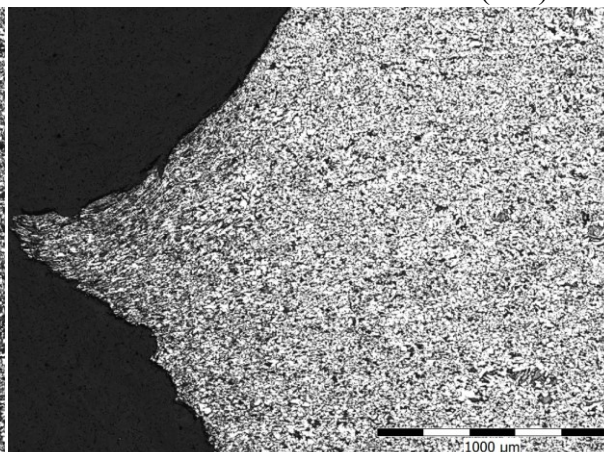
Obr. 30. Struktura č.vz. 655 (100x)**Obr. 31.** Struktura č. vz. 655 (500x)**Obr. 32.** Struktura č.vz. 7063 (100x)**Obr. 33.** Struktura č. vz. 7063 (500x)**Obr. 34.** Struktura č.vz. 164 (100x)**Obr. 35.** Struktura č. vz. 164 (500x)

Obr. 36. Struktura č.vz. 7039 (100x)**Obr. 37.** Struktura č. vz. 7039 (500x)**Obr. 38.** Struktura č.vz. 193 (100x)**Obr. 39.** Struktura č. vz. 193 (500x)**Obr. 40.** Struktura č.vz. 7047 (100x)**Obr. 41.** Struktura č. vz. 7047 (500x)

Obr. 42. Struktura č.vz. 198 (100x)**Obr. 43.** Struktura č. vz. 198 (500x)

Ze všech zkoumaných vzorků vykazovaly největší řádkovitost vzorky 7218 a 7063 zpracované v tunelové peci ve stěně 8,8 mm a vzorky 636 ve stěně 8,8 mm a 164 ve stěně 14,2 mm zpracovaných v krokové peci (viz **Obr. 44 až 47**). Téměř žádnou řádkovitost nevykazovaly vzorky 7199 ve stěně 14,2mm zpracované v tunelové peci a vzorek 608 ve stěně 8,8 mm zpracovaný v krokové peci (viz **Obr. 48 a 49**)

Obr. 44. Řádkovitost vzorku 7218 (50x)**Obr. 45.** Řádkovitost vzorku 636 (50x)

Obr. 46. Řádkovitost vzorku 7063 (50x)**Obr. 47.** Řádkovitost vzorku 164 (50x)**Obr. 48.** Řádkovitost vzorku 7199 (50x)**Obr. 49.** Řádkovitost vzorku 608 (50x)

4. Závěr

K výstavbě nové krokové pece došlo hlavně z důvodu častých nevyhovujících zkoušek rázem v ohybu, kdy byly získávány poměrně často nevyhovující hodnoty absorbované energie, což mělo za následek opakované tepelné zpracování a zdržení s plněním zakázek. Zpočátku zkoušení nové krokové pece docházelo k tomu, že se materiál dostatečně nezchladil. Teplota na vstupu do tunelové pece se pohybovala okolo 720- 820 °C, což vedlo k nevyhovujícím zkouškám absorbované energie. Nerovnoměrnost struktury pak zapříčinila krátká doba pobytu trubek v peci a jejich nedostatečné prohřátí po celé délce. Z tohoto důvodu se instalovaly na chladník před normalizační pecí zarážky, které zpomalují pohyb materiálu, a napomáhají mu zchladnout na cca 620 °C. Pobyt trubek v krokové peci je 4x až 5x delší, než tomu bylo u tunelové pece. Nyní se pohybují hodnoty jak příčných, tak podélných zkoušek absorbované energie stabilně kolem 200 J. Hodnoty tahových zkoušek po zpracování v krokové peci jsou povětšinou nižší, avšak stále bezpečně vyhovující dle požadavků na dané zakázky. Při porovnání mikrostruktury lze konstatovat, že vzorky zpracované v krokové peci mají zrna rovnoměrnější, a ve většině případů i jemnější nebo stejně jemné. Tato rovnoměrnější struktura má pravděpodobně za následek vyšší výsledné hodnoty a jejich menší rozptyl.

Celkově lze tedy konstatovat, že náhrada staré tunelové pece pro normalizační žíhání novou krokovou pecí přinesla zlepšení vlastností vyráběných trubek a zvýšení konkurence schopnosti ve světě. Nadále je však nutné tuto pec testovat a sledovat výsledné vlastnosti vyráběných trubek.

Seznam použité literatury

- [1] TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY a.s.: *Profil provozu* [online]. [cit. 2017-11-11]. Dostupné z: <http://www.trubky.cz/index.php?la=c&id=12>.
- [2] POČTA, Bohumil. *Ocelové trubky: jejich výroba a použití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [3] KOLLEROVÁ, Mária. *Valcovanie*. Bratislava: Alfa, 1991. ISBN 80-05-00729-9.
- [4] TOTTEN G. E. *Steel heat treatment, Metallurgy and technologies*, 2. vyd. Boca Ration: CRC Press, 2007, 820 s. ISBN 0 – 8493 – 8455 – 9.
- [5] ASM Handbook, *Volume 4, Heat treating*, Materials Park Ohio: ASM International, 2002. ISBN 0 – 87170 – 379 – 3.
- [6] VÁŇOVÁ P. *Základy tepelného zpracování*. Skriptum VŠB-TU. Ostrava 2011. 127 s.
- [7] CALLISTER, W. D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. 7. Vyd. New York: John Wiley a Sons, 2007, 722 s. ISBN 0-471-73696-1.
- [8] PÍŠEK, František., Ladislav JENÍČEK, Přemysl RYŠ, Mojmír CENEK, Karel MAZANEC a Antonín HRBEK. *Nauka o materiálu*. I, Nauka o kovech. 2. rozš. a zcela přeprac. vyd. Praha: Academia, 1975.
- [9] JECH Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. Praha SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1969.
- [10] JURČA Radek, JOCHYM Kamil. *ZTP VT – 02: Základní technologický předpis pro válcovací trať Malý Mannesmann*. Účinnost od 1. 5. 2016. Válcovna trub- Ostrava.
- [11] HLUCHÝ, Miroslav. *Strojírenská technologie 1*, Díl 2, Metalografie a tepelné zpracování. Praha: Scientia 1997. ISBN 80-7183-034-8.
- [12] MOLLIKOVÁ, Eva. *Zkoušení materiálů a výrobků*. [online] 12. 12. 2016, Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>.
- [13] VÍTEK Petr. *TS – 02/2014: Odběr zkoušek na úpravně a jejich dělení ve Strojírny a stavby Třinec*. Účinnost od 4. 4. 2016. Válcovna trub- Ostrava.

- [14] PLUHAŘ, Jaroslav a Josef KORITTA. *Strojírenské materiály [Pluhař, 1977, záznam a]/*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1977.